

Стійкість до короткого замикання транспортного силового модуля з SiC MOSFET 4-го покоління

Приклад застосування в тяговому приводі електромобіля (xEV)

Кевін Ленц (Kevin Lenz), ROHM Semiconductor

Вікнесваран Тайуманасамі (Vikneswaran Thayumanasamy), ROHM Semiconductor

Переваги застосування силових карбідокремнієвих (SiC) ключів у трансмісії електричних транспортних засобів (xEV) очевидні, тому карбід кремнію розглядається як технологія наступного покоління. Вища ефективність SiC MOSFET у порівнянні з Si IGBT дозволяє збільшити пробіг електромобіля або зменшити розміри високовольтних батарей, що робить карбідокремнієві ключі особливо привабливими для ринку електротранспорту. Нещодавно компанія ROHM, один з піонерів SiC-технології, анонсувала 4-е покоління SiC MOSFET для широкого класу застосувань.

ЧЕТВЕРТЕ ПОКОЛІННЯ SiC MOSFET ROHM ДЛЯ XEV

З того часу, як компанія ROHM кваліфікувала свої продукти відповідно до автомобільного стандарту AEC-Q101 для SiC у 2012 році, почалося широке впровадження карбідокремнієвих ключів в різні автомобільні системи, в першу чергу зарядні пристрої й DC/DC-перетворювачі. Перший SiC MOSFET-транзистор з Trench-затвором був представлений ROHM вже у 2015 році. Досвід освоєння технологічних процесів і експлуатації модулів допоміг створити наступне покоління силових ключів зі зменшенням на 40% опором каналу RDSon в порівнянні з попереднім поколінням.

Новітні SiC MOSFET ROHM 4-го покоління відрізняються низьким питомим опором каналу на одиницю площі завдяки вдосконаленню канавко-

вої структури затвора (Trench Gate, рис. 1). Одночасно вдалося зменшити паразитну ємність — одне з джерел втрат перемикавання. Це призвело до зниження опору дрейфового шару на 40% і динамічних втрат — на 50% в порівнянні з SiC MOSFET 3-го покоління. Відзначимо, що втрати перемикавання вносять понад 70% в загальне значення потужності, що розсіюється карбідокремнієвими транзисторами в тягових інверторах, тому їх мінімізація сприяє значному підвищенню ефективності [1]. Оптимізація характеристик також дозволила покращити поведінку SiC MOSFET 4-го покоління в режимі короткого замикання (рис. 2).

Покращення динамічних характеристик дає можливість перейти на вищі частоти перемикавання, що дозволяє зменшити розмір радіаторів, конденсаторів та інших компонентів, що використовуються для згладжування

пульсацій напруги і струму. Оскільки габарити цих елементів багато в чому визначають розміри тягового інвертора, робота на підвищених частотах сприяє вирішенню завдання мініатюризації. Розширений температурний діапазон SiC-структур також допомагає зменшити габарити. На відміну від кремнієвих силових напівпровідників, карбідокремнієві транзистори можуть стабільно працювати при температурах до +175 °C і вище за умови, що матеріали корпусу модуля теж розраховані на дані умови. Це спрощує систему відведення тепла шляхом переходу з рідинного охолодження на повітряне і зменшення розмірів радіаторів.

ТЕСТ КЗ

Директива ECPE AQG 324 [2] описує два сценарії короткого замикання, які кваліфікуються на рівні силового модуля:

- КЗ типу 1: включення транзистора на замкнуте навантаження, тобто спочатку в колі немає струму;
- КЗ типу 2: коротке замикання виходу інвертора, що працює.

Через високий струм КЗ і менший допустимий час перевантаження в порівнянні з Si-IGBT, карбідокремнієві транзистори вимагають швидкої й точної реакції на стан перевантаження. Для цього були представлені результати експериментів в частині детектування

і захисту від КЗ нового силового модуля з використанням традиційного методу моніторингу струму стоку (DESAT). Для подібних досліджень використовувався силовий модуль, створений на базі новітніх чипів SiC-MOSFET ROHM з Trench-затвором і призначений для експлуатації в тяговому приводі.

Поведінка SiC-MOSFET 4-го покоління в режимі КЗ

У силових модулях SiC MOSFET ROHM 4-го покоління загальні втрати вдалося знизити без шкоди для довговічності та надійності в термінах часу КЗ. У поєднанні з удосконаленою низькоіндуктивною конструкцією це робить прилади даного типу оптимальними для застосування в тягових інверторах електромобілів.

Прилад, що тестувався, і випробувальна установка

Тести на стійкість до короткого замикання модулів SiC 4-го покоління, представлені в [3], проводилися у випробувальній лабораторії ROHM у Вільхіхе (Німеччина). З цією метою використовувався спеціалізований транспортний IGBT Semikron, а також для проведення тестів була розроблена плата керування на основі драйвера ROHM BM6112 (схема DESAT налаштована на 20 А, реалізовано режим плавного відключення STO).

Прилад, що тестувався (модуль eMPack Semikron), містить чипи SiC MOSFET 4-го покоління. Це трифазний міст з номінальною напругою 1200 В і струмом 780 А, спеціально розроблений для застосування в автомобільних тягових інверторах [4]. Модуль відрізняється наднизьким значенням паразитної індуктивності, отриманим завдяки інноваційній технології внутрішніх з'єднань і підключення до конденсатора DC-шини [3]. Для виявлення стану КЗ використовується традиційний метод моніторингу напруги $V_{CE(sat)}$ (DESAT). При виявленні перевантаження запускається режим плавного відключення ASTO (Advanced Soft Turn Off), що забезпечує швидке і безпечно блокування всіх IGBT. Збірка плати керування і силового модуля показана на рисунку 3.

РЕЗУЛЬТАТИ ТЕСТУВАННЯ

Налаштування схеми захисту драйвера затвора SiC має свої особливості. Попри те, що SiC MOSFET ROHMs

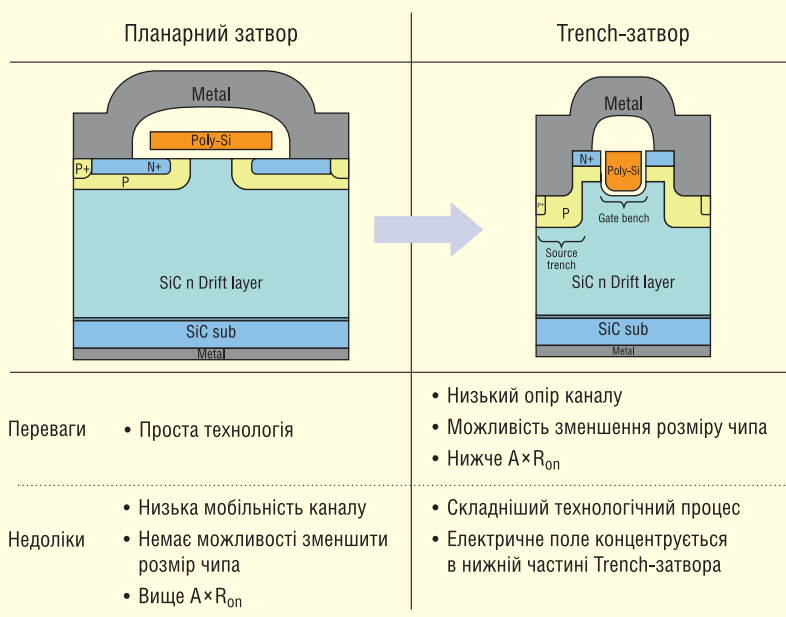


Рис. 1. Планарна та канавкова (Trench) структура затвора

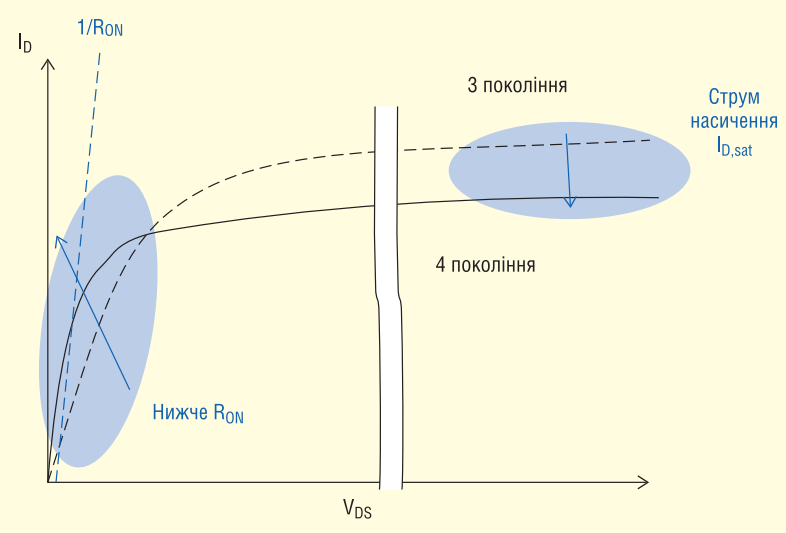


Рис. 2. Оптимізовані характеристики КЗ

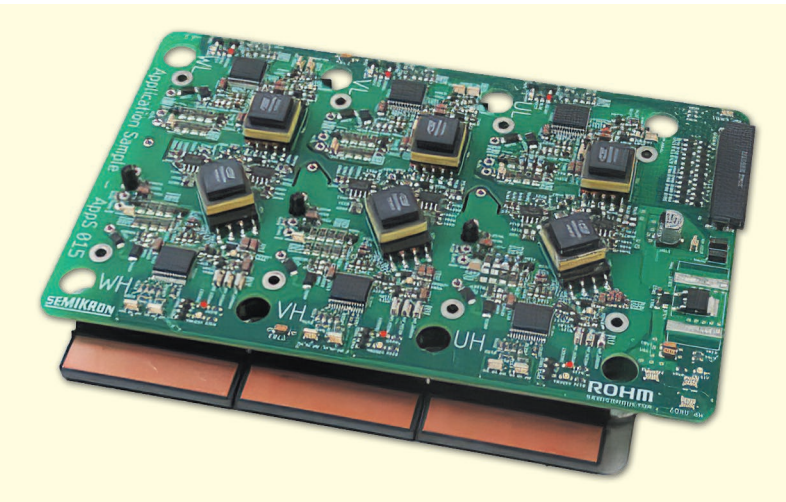
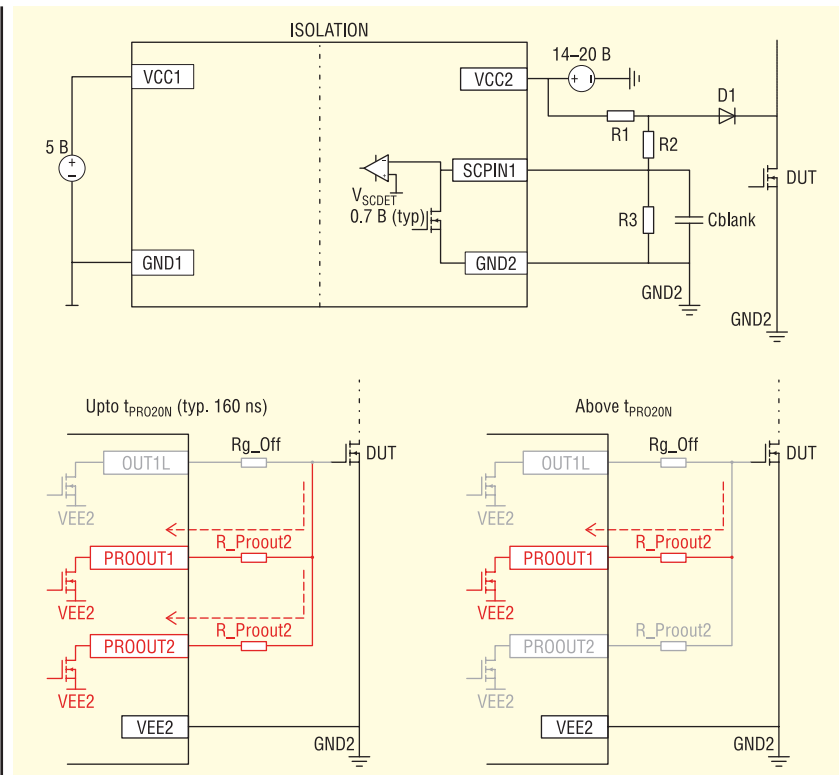


Рис. 3. Плата керування BM6112 і модуль eMPack EMPACK 6CHGD-EVK-301 з шістьма чипами IGBT GDIC BM6112FV і SiC MOSFET, $V_{gson/off}$ 18 В/0 В



**Рис. 4. Вгорі: схема DESAT в драйвері BM6112 (специфікація BM6112);
внизу: схема плавного відключення ASTO [2]**

зміни струму від 10% I_{SC} при включенні до 10% I_C при вимкненні. Існує два основних критерії проектування драйвера затвора, що впливають на режим моніторингу та відключення струму КЗ:

- Цільовий показник режиму DESAT: компроміс між швидкістю виявлення КЗ і параметрами схеми детектування: R1, R2, R3, D1 (рис. 4, вгорі).
- Швидкість вимкнення. Мета: компроміс між часом вимкнення і рівнем перенапруги на паразитній індуктивності $LS \times di/dt$. Функція ASTO: резистор R_PROOUT1 працює протягом ~160 нс після виявлення DESAT і R_PROOUT — решту періоду відключення (рис. 4, внизу).

Плата драйвера затвора (рис. 3 і 4) побудована таким чином, щоб спочатку оцінити роботу схеми DESAT при жорсткому короткому замиканні (наприклад, тип 1). Були протестовані різні сценарії м'якого відключення:

- стандартний режим STO:
R_PROOUT1 = 10 Ом,
R_PROOUT2 відсутній;
- покращений режим ASTO1:
R_PROOUT1 = 10 Ом,
R_PROOUT2 = 1.2 Ом;
- покращений режим ASTO2:
R_PROOUT1 = 10 Ом,
R_PROOUT2 = 2.7 Ом

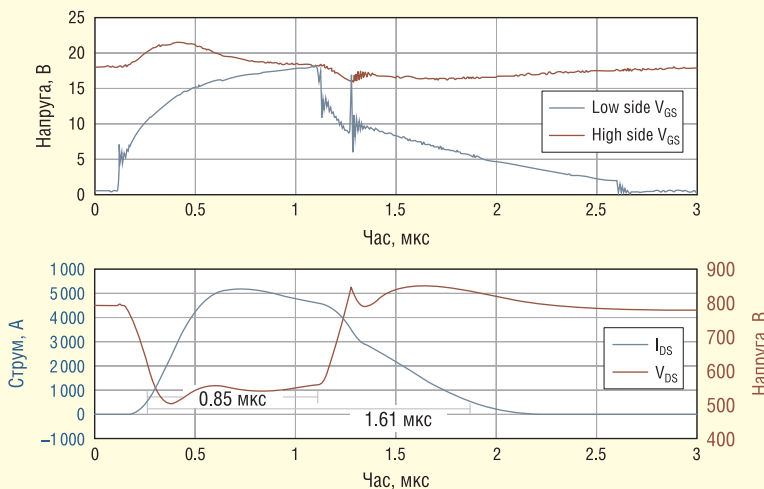
У режимі ASTO1 (рис. 5) зафіксовано найменший час t_{SC} . Однак піковий рівень перенапруги при вимкненні становить 1156 В, що близько до граничного значення для приладів з номінальною напругою 1200 В.

У режимах STO й ASTO2 (рис. 5) амплітуда ΔV може бути помітно знижена (до рівня менше ніж 60 В), що забезпечує хороший запас надійності. Час КЗ у звичайному режимі STO склав близько 2 мкс при величині $\Delta V = 56$ В. У режимі ASTO2 період t_{SC} знижується до 1.6 мкс при тому ж рівні перенапруги, що і STO. Варіант ASTO2, безсумнівно, є кращим, оскільки забезпечує оптимальне поєднання параметрів t_{SC} і ΔV . Тому режим ASTO2 використовується для подальших вимірювань.

На наступному етапі проводилася оцінка впливу температури на характеристики КЗ типу 1 і 2 з використанням функції ASTO2. В ході досліджень проводилися вимірювання параметрів t_D (час детектування DESAT), t_{SC} (час КЗ) і E_{SC} (енергія втрат в режимі КЗ).

Блокування струму короткого замикання в обох випадках можливе протягом 2 мкс. Драйвер затвора виявляє перевантаження незалежно від температури: КЗ 1 в межах 870 нс і КЗ 2 в ме-

4-го покоління розраховані на вищий час КЗ, параметри налаштування базуються на типових вимогах ринку. Типовий час спрацьовування захисту від КЗ після виявлення стану DESAT становить 1.5–2 мкс. Згідно зі стандартом, час короткого замикання t_{SC} визначається інтервалом



Тип режиму плавного вимкнення	V_{Dspk} , В	t_d , нс	t_{SC} , мкс	E_{SC} , Дж
ASTO1	1156	850	1.34	2.88
STO	854	850	2.01	4.26S
ASTO2	856	850	1.61	3.31

Рис. 5. Вгорі: КЗ тип 1, режим відключення ASTO2; внизу: результати з ASTO1 — швидке відключення, ASTO2: повільне відключення

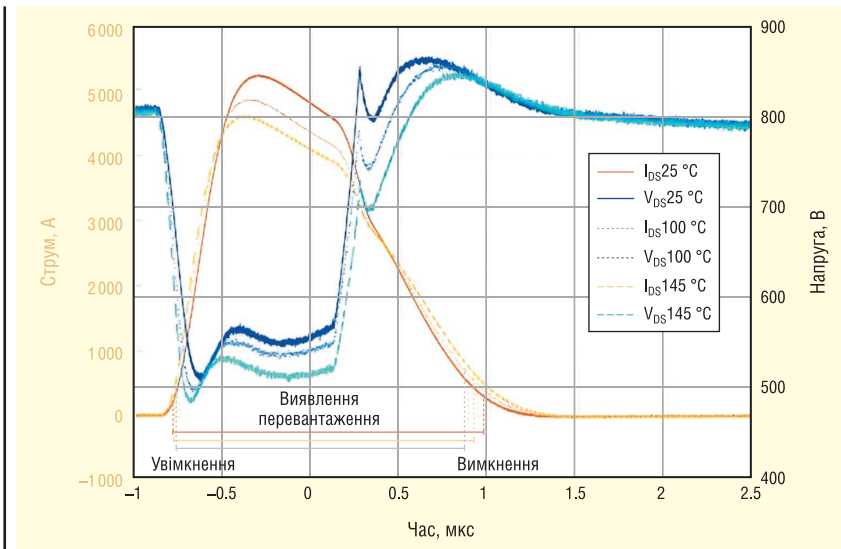


Рис. 6. Коротке замикання, тип 1

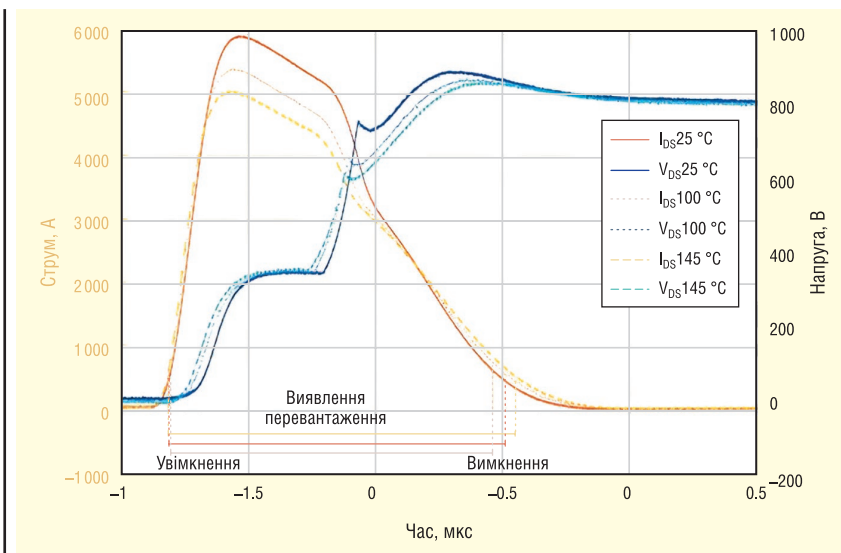


Рис. 7. Коротке замикання, тип 2

жах 550 нс. Схема захисту безпечно відключала силовий модуль протягом 1.7 мкс при КЗ типу 1 та протягом 1.3 мкс при КЗ типу 2. Відповідні характеристики показані на рисунках 6 і 7.

ВИСНОВОК

Новітнє покоління SiC MOSFET ROHM має високу стійкість до короткого замикання. Струм КЗ тестованого транзистора з робочою напругою 1200 В приблизно в 6 разів перевищує номінальне значення. Підсумковий час відключення струму КЗ — 1.6 мкс виявився нижче цільового значення (<2 мкс), а завдяки оптимізації схеми драйвера (функції DESAT і ASTO) перенапруга при вимкненні склала менше ніж 60 В.

Збірка модуля eMPack від компанії Semikron Danfoss з чипами SiC MOSFET 4-го покоління і драйвера затвора ROHM BM6112, розроблена для застосування в тяговому приводі xEV, забезпечує найвищий рівень продуктивності та надійності.

Література:

1. Tamegai Y. *The Impact of Silicon Power*. ROHM Co., Ltd., White Paper.
2. *ECPE Guideline AQG 324*, Release 03.1/2021.
3. Thayumanasamy V. *Short circuit protection of a power module with Trench-SiC MOSFET. Can DESAT be fast enough?* Nuremberg, PCIM 2022.
4. <https://www.semikron-danfoss.com/products/power-modules/power-modules-by-product-line/empack>

РАДІОМАГ

МЕРЕЖА МАГАЗИНІВ РАДІОДЕТАЛЕЙ

www.radiomag.com.ua